

Конденсация микрокапель воды в электрическом поле при различной температуре

Габышев Дмитрий Николаевич

Тюменский государственный университет

gabyshev-dmitrij@rambler.ru

Связь атмосферного электричества и осадков друг с другом привлекает внимание исследователей уже много лет. Первые лабораторные попытки исследовать капли воды в электрическом поле относятся к началу XX века. Среди прочих вопросов, можно обособить проблему конденсационного роста в электрическом поле и смежные с ней темы, которые интересуют учёных в последние десятилетия всё больше [1, 2]. Такого рода условия складываются в облаках, где напряжённость электрического поля составляет порядка 10^5 В/м, а наиболее интенсивный конденсационный рост происходит в нижней зоне облаков.

Есть много работ, подробно рассматривающих как испарение, так и конденсационный рост капель. Однако, несмотря на всё, прямое наблюдение единичных левитирующих капель в реальном времени как в природных условиях, так и в лаборатории, всё ещё представляет большую методическую трудность. Любые достижения в этом деле вызывают существенный интерес. Для экспериментальной работы с отдельными каплями воды мы использовали технологию капельных кластеров, свободно левитирующих над плоской поверхностью испаряющейся воды из-за давления восходящего паровоздушного течения [3]. Капли самоорганизуются в упорядоченную структуру, близкую к гексагональной и существующую десятки секунд (рис. 1а). Маломобильные капли кластера удобны для визуального наблюдения. Они преодолевают многометровую дистанцию относительно потока, в котором левитируют, и это роднит их с каплями природных осадков, преодолевающими большое расстояние от облака по направлению к земле в ходе гравитационной седиментации. В системе отсчёта, движущейся с терминальной скоростью, капля осадков почти неподвижна, как и капля кластера. В обоих случаях капля немного возмущает набегающий встречный поток, создавая микроскопические завихрения, толкающие её случайным образом. Такого рода случайное колебательное движение было совсем недавно изучено с помощью капельного кластера [4]. Однако наиболее интенсивно сейчас развиваются те микрометеорологические приложения технологии, которые связаны с воздействием электрического поля [5–8].

Экспериментальная установка с конфигурацией электродов, используемых для создания практически однородного электрического поля в области левитации кластера, подробно описана в работе [7]. Нижний электрод, расположенный под подложкой с водой, над которой кластер левитирует, заземлялся, а на верхний подавался потенциал U . Расчёт поля в [5] показал, что напряжённость в районе кластера связана с потенциалом на верхнем электроде формулой:

$$E = \left(\frac{U}{U_0}\right) \cdot 220 \frac{\text{В}}{\text{м}}, \quad (1)$$

где $U_0 = 1$ В. Ранее уже было показано [7], что электрическое поле кратно усиливает конденсационный рост микрокапель, причём скорость роста линейно зависит от приложенного электрического поля E . В текущем исследовании была поставлена задача изучить температурную зависимость скорости конденсационного роста на фиксированном интервале температур. В качестве единицы измерения скорости роста капли по обыкновению принимают величину, равную приращению единицы площади поверхности капли за единицу времени:

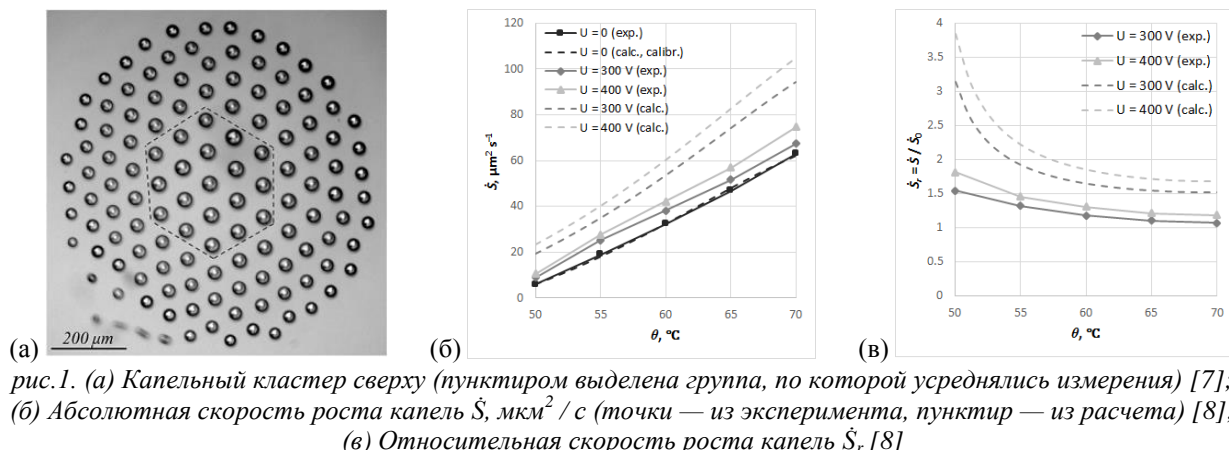
$$\dot{S} = \frac{dS}{dt}. \quad (2)$$

Кроме того, удобно использовать относительную скорость $\dot{S}_r = \dot{S} / \dot{S}_0$, где \dot{S}_0 — значение \dot{S} при $E = 0$.

Изображения капельных кластеров снимались при температурах от 50 до 70 °С с шагом 5 °С [8]. Данные были получены в отсутствие электрического поля, а также при $U = 300$ В и $U = 400$ В, что соответствует значениям $0.66 \cdot 10^5$ и $0.88 \cdot 10^5$ В/м, согласно (1). С помощью специально написанной компьютерной программы автоматически распознавалось положение капель и их размер. Далее рассчитывалась скорость роста капель по формуле (2) и это значение усреднялось по центральной группе капель, которая на рис. 1а выделена пунктиром. Экспериментальные точки собраны на рис. 1б и 1в, где они соединены сплошными линиями.

Для теоретического расчета скорости конденсационного роста (пунктирные кривые на рис. 1б и 1в) использовалась кинетическая модель, разработанная в работе [7] на основе подхода, предложенного в [1]. Согласно этому подходу, молекулы водяного пара, попадающие в приповерхностный слой Кнудсена, окружающий каплю, ускоряются в локальном электрическом поле этого слоя. В нашем случае напряжённость локального поля равна векторной сумме напряженностей поля внешнего, поля поляризации капли и поля её собственных электрических зарядов. Одним из источников температурной зависимости в этой модели является наличие такой зависимости для ориентационной поляризации молекул водяного пара в воздухе [2], что не было

учтено в статье [7], где учитывалась только деформационная поляризация. Из-за отсутствия возможности напрямую измерить влажность воздуха в области капельного кластера расчёт начальной скорости при $E = 0$ калибруется по экспериментальным значениям. Подробнее детали расчёта приведены в работе [8].



Расчёт продемонстрировал качественное согласие с экспериментом: совпадает порядок и взаимное расположение кривых. С ростом температуры растёт абсолютная влажность воздуха вблизи кластера, поэтому повышается абсолютная скорость роста его капель (рис. 1б). Однако из-за повышения температуры усиливается хаотичность движения молекул водяного пара, приводящая к уменьшению ориентационной поляризации молекул. Как следствие, уменьшается вклад электро-индуцированной конденсации, который можно вычислить как $\dot{S}_r - 1$ из рис. 1в. На рассматриваемом интервале температур снижение температуры, напротив, повышает значимость электро-индуцированной конденсации в процессе роста капли. В связи с этим мы предполагаем, что электро-индуцированная конденсация играет существенную роль при более низких температурах, в частности, при тех, которые имеют место в облаках. Пролить свет на эту гипотезу в будущем поможет развитие технологии «холодного» капельного кластера, который позволяет генерировать левитирующие капли при температурах ниже 30°C [9], однако на данном этапе определённые технические ограничения пока не позволили применить её напрямую к задаче о конденсации в электрическом поле.

Исследование было выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (МК-819.2020.2) и Госзадания Минобрнауки РФ (FEWZ-2020-0004).

Список публикаций:

- [1] Guerrini A., Murino G. // *Il Nuovo Cimento C*. 1990. V. 13. No. 3. P. 663.
- [2] Singh N., Singh D. // *Indian J. Radio & Space Phys.* 2004. V. 33. No. 1. P. 43.
- [3] Федорец А. А. // *Письма в ЖЭТФ*. 2004. Т. 79. №8. С. 457.
- [4] Fedorets A. A. et al. // *J. Phys. Chem. C*. 2019. V. 123. P. 23572.
- [5] Fedorets A. A. et al. // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2019. V. 133. P. 712.
- [6] Fedorets A. A. et al. // *14th Int. Conf. on Heat Transfer, Fluid Mech. and Thermodyn. (HEFAT-2019)*, Wicklow, Ireland, 2019.
- [7] Gabyshev D. N. et al. // *J. Aerosol Sci.* 2019. V. 135. P. 103.
- [8] Gabyshev D. N. et al. // *Atmos. Res.* 2020 (на рецензировании).
- [9] Fedorets A. A. et al. // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017. V. 113. P. 1054.

Исследование термогидродинамических процессов при диагностике параметров трещины гидроразрыва нефтяного пласта

Давлетишин Филюс Фанизович

Шарафутдинов Рамиль Файзырович

Башкирский государственный университет

Шарафутдинов Рамиль Файзырович д.ф.-м.н.

Felix8047@mail.ru

На сегодняшний день в связи со снижением темпов добычи нефти, ростом осложненного фонда скважин ключевыми задачами нефтедобывающих предприятий являются повышение рентабельности и технико-экономической эффективности эксплуатации скважин. Решение этих задач может быть достигнуто путем своевременного и достоверного геофизического контроля разработки нефтегазовых месторождений.